

NASA

TM-76458

417

N81-1913

HK80071

液压伺服加载系统的调试和 简单分析

马良甫

中国航空研究院

1980年8月

A Brief Analysis and Its Experiment of the Hydraulic-electric Loading Servosystem

Ma Liang-fu

Abstract

The hydraulic-electric loading servosystem is a kind of force generator . as is named, a force simulator.

It can be used to simulate the hinge moment of the control surface for aircraft, and still to be a stick force generator.

According to the experiences of a real system, this paper deals with theoretical analysis of the loading system and its characteristics, and discusses the possibility of improving its performances.

内 容 提 要

液压伺服加载系统是一种力产生器，或者叫力的模拟装置。它可以用来模拟飞机舵面所受的铰链力矩，也可以用作杆力产生器。

本文以实际系统为依据，通过简要的理论分析，对加载系统工作特点，提高系统性能的可能途径，结合实际调试过程，作了简要阐述。本文可供从事该项工作的同志参考。

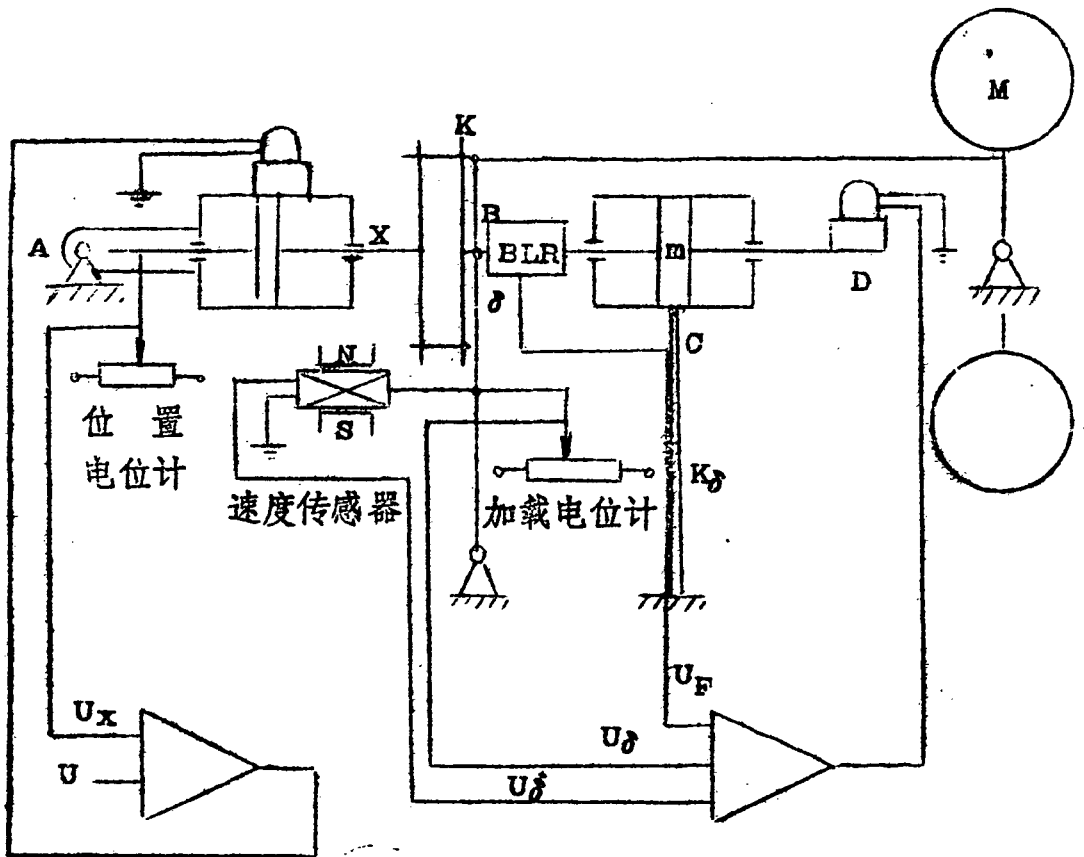
符 号 说 明

A_1	—被试舵机作动筒活塞杆面积	mm^2
A_2	—加载作动筒活塞杆面积	mm^2
K_c	—加载作动筒筒体支撑, 包括拉压力传感器在内的加载作动筒活塞杆之总刚度	Kg/mm
K	—加载对象的机械刚度	Kg/mm
M	—加载对象的质量	$\text{Kg} \cdot \text{sec}^2/\text{mm}$
BLR	—电阻式拉压力传感器	
x	—舵机(或助力器)活塞杆位移	mm
δ	—舵面位移	mm
K_1	—放大器电流放大倍数	mA/mv
W_{10}	—被试舵机用流量型伺服阀的空载传递函数	
s	—拉普拉斯算子	
K_x	—被试舵机位置反馈系数	mv/mm
U	—被试舵机输入电压	mv
U_x	—被试舵机反馈电压	mv
Q_1	—被试舵机伺服阀空载流量	mm^3/sec
i	—放大器输出电流	mA
C	—伺服阀阻尼系数	
T	—被试舵机伺服阀时间常数	
K_Q	—被试舵机伺服阀流量放大倍数	$\text{mm}^3/\text{sec mA}$

C — 加载对象杆系的阻尼系数	$Kg \cdot sec/mm$
K_d — 舵面电位计的电压梯度	mV/mm
K_d^s — 舵面速度传感器电压梯度	$mV sec/mm$
U_d — 舵面电位计输出电压	mV
U_F — 力反馈电压	mV
U_d^s — 速度补偿电压	mV
W_1 — 放大器加校正网络传递函数	
W_{20} — 加载伺服阀空载传递函数	
K_u — 力反馈系数	
Q_2 — 加载伺服阀空载流量	mm^3/sec
C_0 — 加载作动筒洩漏系数	$mm^5/sec Kg$
$C_{pe} = C_0 + \frac{\partial Q_2}{\partial p} = C_0 + K_{Q_2}/K_{P_2}$	$mm^5/sec Kg$
V — 加载作动筒的半容腔体积	mm^3
N — 液压油的体积弹性系数	Kg/mm^2
m — 加载作动筒活塞杆质量	$Kg sec^2/mm$
b — 加载作动筒的阻尼系数	$Kg sec/mm$
P — 加载作动筒二腔压差	Kg/mm^2
F — 加载力	Kg
K_{Q_2} — 加载伺服阀流量放大倍数	$mm^3/sec mA$
K_{P_2} — 加载伺服阀压力增益	$Kg/mA \cdot mm^2$

液压伺服加载系统的调试及简要分析

一、加载系统的组成：

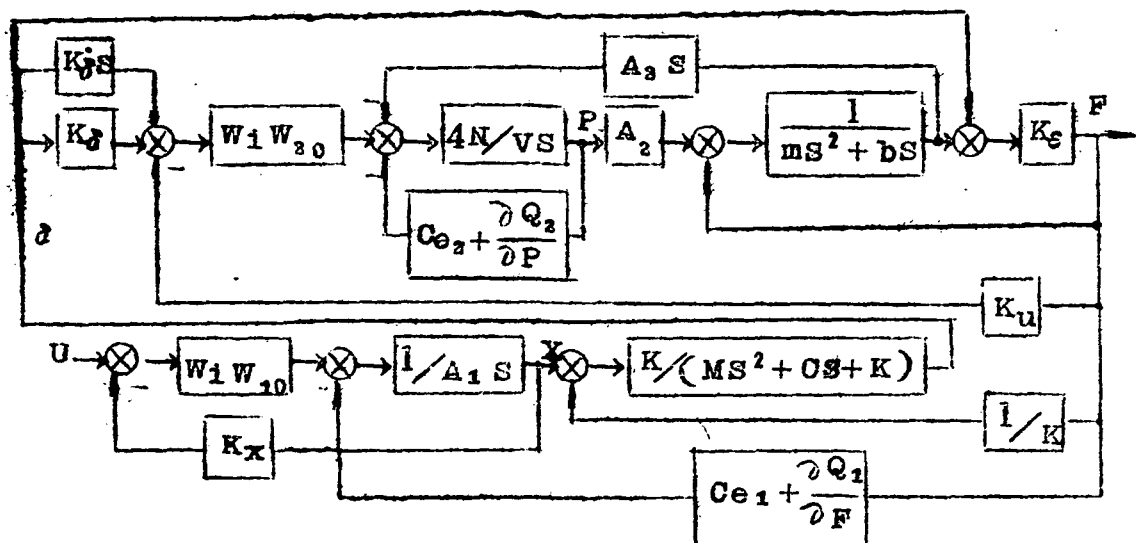


其中：A-X 被试舵机。由放大器、位置电位计、阀、作动筒等所组成。本文称之为位置系统。

B-C-D 加载系统。由作动筒，阀、放大器，拉压力传感器，应变仪，加载电位计，速度传感器等所组成。

A-B-M 称为被试系统。包括被试舵机及由它所带动的杆系，
其中主要有刚度模拟器 **K**，质量模拟器 **M**。

三 方块图：



其中：
$$W_1 = K_1 \frac{T_2 s + 1}{T_1 s + 1} \quad W_{20} = \frac{KQ_2}{T_2^2 s^2 + 2T_2 \zeta s + 1}$$

$$W_{10} = \frac{KQ_1}{T^2 s^2 + 2T\zeta s + 1}$$

图 二

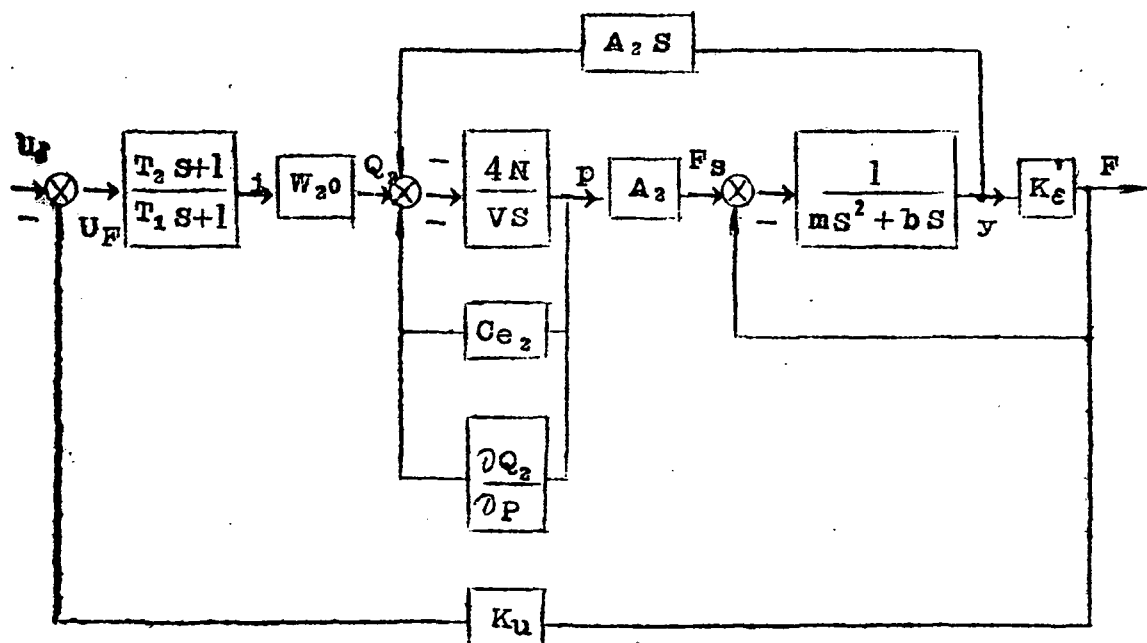
被试系统和加载系统之间的关系比较复杂，但就图中而言，被试系统主要通过位移 δ 对加载系统产生影响，而加载系统则通过力 F 的形式反作用于被试系统。我们可以设想，如果加载系统能正确无误地复现被试系统的加载指令 U_δ ，则加载系统就成为理想的系统了。但事实并非如此，由于 δ 干扰的存在，使加载系统除提供与 U_δ 成比例的力以外，还附加另外一种力，称附加力，或多余力，有人称它为干扰力。此力与 δ 的各阶导数有关，影响最大的是 δ 和 $\dot{\delta}$ 。

就加载系统的输入形式而言，可以分成二种：电压讯号 U_δ ，机械输入（或称干扰输入） δ 。有人称为电指令和运动指令。电指令，指的

是舵机(或助力器)不作任何运动,控制信号以电压 U_δ 的方式作用到放大器的输入端。运动指令指的是舵机运动一位移 δ , 而 $K_\delta=0$, 即 $U_\delta=0$ 。在一般情况下舵机要运动, 而且 $K_\delta \neq 0$, 但这种情况, 可以看成是上述二种基本输入形式的迭加而已。加载系统对上述二种基本输入形式的频率响应是各不相同的。我们用力小闭环来描述系统对电指令的反应; 用大回路的空载特性, 即加载梯度 $K_\delta=0$ 时系统对机械位移的跟踪特性, 也做叫抗干扰特性来描述系统对运动指令的反应。因此设计调试时应当兼顾这二方面的要求, 任何只顾其一, 都是不合适的。

三 力小闭环

1. 力小闭环的方块图



其中:

$$K'_e(s) = K_e \left\{ 1 + \left(\frac{(C_{Q_2} + \partial Q_2 / \partial p)(T^2 s^2 + 2T\zeta s + 1)}{A_1(T^2 s^2 + 2T\zeta s + 1)} + \frac{1}{s + K_x K_1 K_{Q_1}} \right) \frac{K K_e}{M s^2 + C s + K} \right\}$$

- 6 -

为了便于分析，取 $M = C = 0$

$$C_{\theta 1} + \frac{\partial Q_1}{\partial \theta} = 0$$

即位置系统的动静刚度都等于 ∞ ，此时相当于 A B 之间用一刚度为 K 的直杆来代替这个位置系统（舵机或助力器）此时：

$$K'_\varepsilon(s) = \frac{K_\varepsilon}{1 + \frac{1}{K} \cdot K_\varepsilon} = \frac{KK_\varepsilon}{K + K_\varepsilon}$$

即 K'_ε 等于刚度各为 K ， K_ε 的两个刚度模拟器的串联值，并为一常数。

2. 传递函数

开环传递函数为

$$\frac{U_F}{U_\theta} = \left(K_1 \frac{T_2 s + 1}{T_1 s + 1} \right) \left(\frac{K Q_2}{T_2^2 s^2 + 2T_2 \xi s + 1} \right) \cdot \left(\frac{K_\varepsilon K_N A_2}{m T_N s^3 + (m + b T_N) s^2 + (K_N A_2^2 + K_\varepsilon T_N + b) s + K_\varepsilon} \right) K_u \quad (2)$$

$$\text{其中：} T_N = \frac{V}{4 N C_{pe}}, \quad K_N = \frac{1}{C_{pe}}, \quad C_{pe} = C_{\theta 2} + \frac{\partial Q_2}{\partial \theta}$$

开环放大倍数：

$$K_0 = K_1 K Q_2 K_\varepsilon K_N A_2 K_u / K_\varepsilon = K_1 K Q_2 A_2 K_u / C_{pe} \quad (3)$$

值得注意的是式(3)中 K_0 与 K_ε 无关。

闭环传递函数：

$$\frac{F}{U_\theta} = \frac{(T_2 s + 1) K_1 K_\varepsilon K Q_2 A_2}{\sum_{j=0}^6 a_j s^j} \quad (4)$$

$$a_6 = T_1 T_3^2 mV / 4N \quad (5)$$

$$a_5 = T_3^2 mV / 4N + T_1 (T_3^2 (mC_{pe} + bV / 4N) + 2T_3 \xi mV / 4N) \quad (6)$$

$$a_4 = T_1 (T_3^2 bC_{pe} + mV / 4N + 2T_3 \xi (mC_{pe} + bV / 4N)) + T_3^2 (mC_{pe} + bV / 4N) + 2T_3 \xi mV / 4N + K_e T_1 T_3^2 V / 4N + A_2^2 T_1 T_3^2 \quad (7)$$

$$a_3 = T_1 (2T_3 \xi bC_{pe} + mC_{pe} + bV / 4N) + T_3^2 bC_{pe} + mV / 4N + 2T_3 \xi (mC_{pe} + bV / 4N) + K_e (T_1 T_3^2 C_{pe} + (2T_1 T_3 \xi + T_3^2) V / 4N) + A_2^2 (2T_1 T_3 \xi + T_3^2) \quad (8)$$

$$a_2 = T_1 bC_{pe} + 2T_3 \xi bC_{pe} + mC_{pe} + bV / 4N + A_2^2 (T_1 + 2T_3 \xi) + K_e ((T_1 + 2T_3 \xi) V / 4N + (2T_1 T_3 \xi + T_3^2) C_{pe}) \quad (9)$$

$$a_1 = bC_{pe} + A^2 + K_e (V / 4N + (T_1 + 2T_3 \xi) C_{pe} + K_1 K_u K_{Q_2} T_2 A_2) \quad (10)$$

$$a_0 = K_e (C_{pe} + K_1 K_u K_{Q_2} A_2) \quad (11)$$

所以闭环放大倍数：

$$K_{00} = K_1 K_e K_{Q_2} A / K_e (C_{pe} + K_1 K_u K_{Q_2} A_2) \approx 1 / K_u \quad (12)$$

这是因为在一般情况下

$$C_{pe} \ll K_1 K_u K_{Q_2} A_2$$

在我们这个系统里，它们是 1 与 6.9 之比，所以初步分析， C_{pe} 完全可以略去。

3. 开环频率特性曲线：

对于 AB 是一直杆和 AB 是一位置系统，我们实际测得的开环频率特性曲线，如图四、图五所示，从曲线中我们可以看出几点：

(1) 当 A B是一直杆时，由(2)式确定的理论曲线和实际结果很接近。

(2) 当 A B是一位置系统时，情况就不太一样，它比 A B是一直杆时多了二个环节： $f=7.5$ 的惯性环节和 $f=20\text{Hz}$ 的微分环节，这是位置系统影响的结果，因而在这里 K_e 已经不是一个比例环节，由(1)式可知：

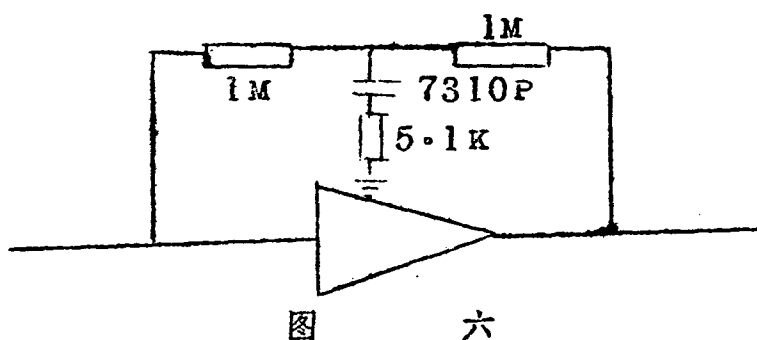
$$K_e'(s) = \frac{[A_1(T^2 s^2 + 2T_\xi s + 1)S + K_x K_1 K_{Q1}] K_e}{(1 + K_e/K)(A_1(T^2 s^2 + 2T_\xi s + 1)S + K_x K_1 K_{Q1}) + C_{pb}(T^2 s^2 + 2T_\xi s + 1)K_e/A_1} \quad (13)$$

其分子分母均不为常数。

(3) 电液伺服阀的转折频率，在 A B是一直杆的曲线上，可以明显看出 $f=35$ 周/秒，比实测空载伺服阀频带 $f=90$ 周/秒小了很多，其原因是由于工作条件不同所造成。

4. 小闭环特性的改善：

为了提高加载系统的特性，小闭环的频带是一个关键指标，但在我们这个系统里，不加校正，小闭环频带只有 50 周/秒，为了展宽小闭环的频带，我们在上述开环特性曲线的基础上，而且是在 A B是一直杆而测得的开环频率特性曲线基础上进行校准的，这严格说来是不合理的，应当是在 A B是一位置系统这样一种与实际工作一致的条件下进行校正才对，但是由于实际位置系统引进的一对另极点很靠近，所以其影响不大，因此校正后接到系统里去效果很好，我们选择在 $f=35$ 稍后一点的 $f=43$ 处，设置了一个另点，加上一微分校正网络，线路如下：



其传递函数为：

$$W_1 = \frac{T_2 S + 1}{T_1 S + 1}$$

其中： $T_1 = 0.000037$ ， $T_2 = 0.0037$ T_1, T_2 差 100 倍。

校正结果从开环频率特性曲线上可以看到，相频特性曲线抬起来了，频带展宽了。在直杆情况下，未加校正时，截止频率约 50 周/秒左右，加校正后，截止频率提高到 85 周/秒以上，在位置系统情况下，未加校正，截止频率 $f = 48$ 周/秒左右，加校正后， f 也在 85 周以上。且阻尼加大，开环放大倍数还可提高。

校正点取 $f = 43$ 有二点考虑：第一，在实际工作中，伺服阀的截止频率是一个变化着的参数，它与支撑刚度，洩漏负载，工作电流都有密切关系。我们曾经做过这样的试验，在阀的二个工作腔出口，直接接上二个压力传感器，不接任何容腔，所以阀就无流量输出，这样测得的阀的截止频率只有 $f = 29\text{Hz}$ ，而 A B 为一直杆，接上作动筒后 $f = 35$ 。空载大电流时 $f = 90$ 周/秒。可见阀的截止频率是变的，第二个考虑是，当引入校正网络后，交流声显著增大，从数字计算分析看， T_2 增大，好处会更大些，但实际使用时， T_2 加大了，50 周/秒交流将成

倍增加，反而会使系统无法工作。

四 大回路的空载特性

1. 上面已经说过，它是表示它对位置系统的跟踪特性，实际上，它是反映系统全貌的综合特性，用单位位移所产生的力 F/x 随频率 τ 的变化的特性来衡量。当略去位置系统的影响时，其传递函数为：

$$\frac{F}{x} = K_c \left(\sum_{i=0}^6 b_i s^i \right) / \sum_{j=0}^6 \left(a_j + \frac{K_c}{K} b_j \right) s^j \quad (14)$$

其中：

$$b_0 = T_1 T_3^2 m v / 4N \quad (15)$$

$$b_1 = T_3^2 m v / 4N + T_1 \{ T_3^2 (m C p e + b v / 4N) + 2 T_3 \xi m v / 4N \} \quad (16)$$

$$b_2 = T_1 \{ T_3^2 b C p e + m v / 4N + 2 T_3 \xi (m C p e + b v / 4N) + T_3^2 (m C p e + b v / 4N) + 2 T_3 \xi m v / 4N + A_2^2 T_1 T_3^2 \} \quad (17)$$

$$b_3 = T_1 \{ 2 T_3 \xi b C p e + m C p e + b v / 4N \} + T_3^2 b C p e + m v / 4N + 2 T_3 \xi (m C p e + b v / 4N) + A_2^2 (2 T_1 T_3 \xi + T_3^2) \quad (18)$$

$$b_4 = T_1 b C p e + 2 T_3 \xi b C p e + m C p e + b v / 4N + A_2^2 (T_1 + 2 T_3 \xi) - A K_1 K Q_2 T_2 K \delta \quad (19)$$

$$b_5 = b C p e + A_2^2 + K_1 K Q_2 A_2 (T_2 K \delta - K \delta) \quad (20)$$

$$b_6 = K \delta K_1 K Q_2 A_2 \quad (21)$$

a_j 前面已经列出：

2 频率特性的理论曲线

$$\text{当： } T_1 = 0.000037 \quad T_2 = 0.0037 \quad T_3 = 0.00455$$

$$\xi = 0.6 \quad m = 0.0001 \quad v = 37000$$

$$\begin{aligned}
C_{pe} &= 12580 & A_2 &= 1000 & b &= 1 \\
K_1 &= 0.083 & K_{Q_2} &= 4.86 \times 10^4 & K_e &= 4650 \\
N &= 140 & K_d &= 0 & K_u &= 0.216 \\
K &= 3500
\end{aligned}$$

(单位: mm, K_g, S, mA, mV)

时, 其幅频特性的理论曲线如图七所示。

当 $r = 1$ 时, 幅频特性曲线的截距, 近似有如下公式:

$$\begin{aligned}
20 \lg \frac{F}{x} \Big|_{f=1} &\approx 20 \lg \frac{2\pi K_e b_1}{a_0} = \\
&= 20 \lg \frac{2\pi (b C_{pe} + A_2^2 - K_1 K_{Q_2} A_2 K_d)}{C_{pe} + K_1 K_u K_{Q_2} A_2} \quad (22)
\end{aligned}$$

3. 单位速度的附加力:

在低频段附加力与速度 \dot{x} 成正比, 因此有近似公式:

$$\frac{F}{\dot{x}} \approx \frac{K_e b_1}{a_0} = \frac{b C_{pe} + A_2^2 - K_1 K_{Q_2} A_2 K_d}{C_{pe} + K_1 K_u K_{Q_2} A_2} \quad (23)$$

它与(22)式是等价的

当 $K_d = 0$ 时有:

$$\frac{F}{\dot{x}} \approx \frac{b C_{pe} + A_2^2}{C_{pe} + K_1 K_u K_{Q_2} A_2} = \frac{b + A_2^2 / C_{pe}}{1 + K_1 K_u K_{Q_2} A_2 / C_{pe}} = \frac{b + A_2^2 / C_{pe}}{1 + K_0} \quad (24)$$

由此可见, 要降低单位速度的附加力, 可以有几种办法, 加大开环放大倍数 K_0 , 可以使 F/\dot{x} 减小, 但开环放大倍数增加, 就会使系统失去稳定性, 因此首先必须增加原有系统的稳定贮备, 才能谈得上提高开环放大倍数 K_0 , 这样的办法, 从理论和实践都证明, 至少有下面四个

途径：

(1) 前面已讲过，加入校正网络以后，系统稳定储备增加了，因此可以使开环放大倍数 K_0 大大提高，因此不仅可以展宽小闭环频带，对电指令的反应加快，而且可以明显地降低空载阻尼力（低频时的附加力）这是个最重要的方法。

(2) 降低系统刚度 K_ε 或 K ：

从开环传递函数中可知，其第一个转折频率的近似公式有：

$$f_1 = \frac{K_\varepsilon}{2\pi(K_N A_s^2 + K_\varepsilon K_N + b)}$$

将上面的参数代入，可求得 $f_1 = 3.5$ 周/秒。

若将 K_ε 从 4550 降到 465 Kg/mm 时，则有 $f_1 = 0.75$ 。在这种情况下，经分析计算可知，系统稳定性增加了，开环放大倍数可以大大提高，实验证明，这种分析结果的趋势是正确的。例如当由 D 点测得加载作动筒活塞杆的总支撑刚度的 3390 Kg/mm 时， $K_u = 0.216$ ，此时

$$\frac{F}{\ddot{x}} = 0.95 \text{ Kg sec/mm} \quad 20 \lg \frac{F}{\ddot{x}} = 15.5 \quad \text{当 } r = 1 \text{ 时}$$

当总刚度为 280 Kg/mm 时， K_u 可增至 $K_u = 0.346$ ，此时

$$\frac{F}{\ddot{x}} = 0.605 \text{ Kg sec/mm} \quad 20 \lg \frac{F}{\ddot{x}} = 11.6 \quad \text{当 } r = 1 \text{ 时。}$$

(3) 增加洩漏系统 C_{pe}

从理论分析知道，增加 C_{pe} 不仅能直接降低 F/\ddot{x} 值，而且也能增加系统的稳定性起到 K_ε 相同的作用，实验结果也证明是这样的，与理论

分析趋势是一致的。增加洩漏的具体处理办法是在作动筒两腔间增设一个节流小孔，节流孔直径由实验确定，但至少要考虑以下两个问题：压力损失和系统的非线性。

(4) 引入速度校正

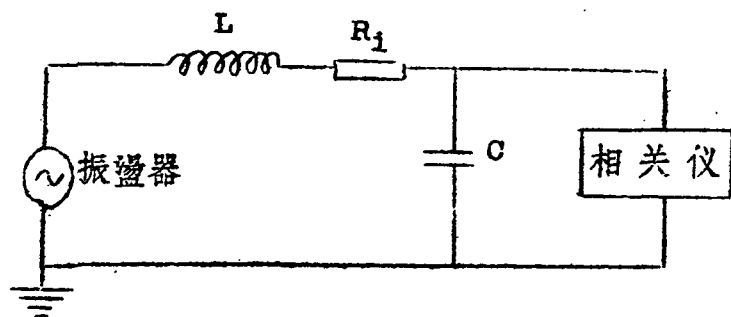
从理论公式(23)明显地看到， $K\delta$ 能降低 F/\dot{x} 值，但进一步分析告诉我们，引进速度讯号 $U\delta$ 只能改善系统的低频性能，见图八、图九因为附加力不仅包括与速度有关的阻尼力，而且还有加速度引起的惯性力和其他更高次的力，在低频段以阻尼力为主，在高频率以其他力为主，因此速度讯号只对低频段起作用，也就很自然了。

速度讯号虽然能在一定范围内降低 F/\dot{x} 值，但它的安装要特别注意，它的运动不能有涩赋现象，否则很容易激起系统高频振盪。若能做到以下一点，速度传感器的安装才算附合要求了，即当舵机以 $f=1 \sim 2$ 周/秒运动时，速度讯号慢慢从零加大，示波器上多余力可以看到在逐渐减小，（否则说明极性接反了），当多余力小而变大，并不引起系统激振，甚至没有激振的趋势，那么就可以认为速度传感器的安装是成功的。否则就得重新努力进行安装调整。但这种情况往往不容易达到。前面已经指出，速度讯号仅仅在低周有效果，大概在 $f=15\text{Hz}$ 以前，而且速度讯号引起的自激的频率基本上和小闭环自振频率一致，约 $f=100$ 周/秒左右。因此我们在速度传感器输出端串联一个低通网络 $\frac{1}{TP+1}$ ， T 取 0.0159 ，这样系统就不太容易自振了，速度传感器的安装也就容易一些，但是这样一来速度讯号的作用也要提前结束。如图八所示，低通网

络的作用，在 $f \approx 7\text{Hz}$ 左右就开始表露，这是它的缺点。

速度讯号容易引起自振的原因，主要有二点，首先，速度讯号的作用是使加载作动筒能更快地跟上被试舵机的运动，（这也是它能减小空载阻尼力的原因所在）因此从位置角度来看，它是一个正反馈讯号，因此使系统稳定性下降，容易引起自振。第二，系统本身，常常处在微弱的自激状态，或者叫高频扰动。从示波器我们可以看到这一点，用在杆力模拟器时，我们可以用手感触到这一点，一旦速度传感器安装欠佳，就会把这样微弱的扰动放大，成为名符其实的自激振荡，发出刺耳尖叫声。

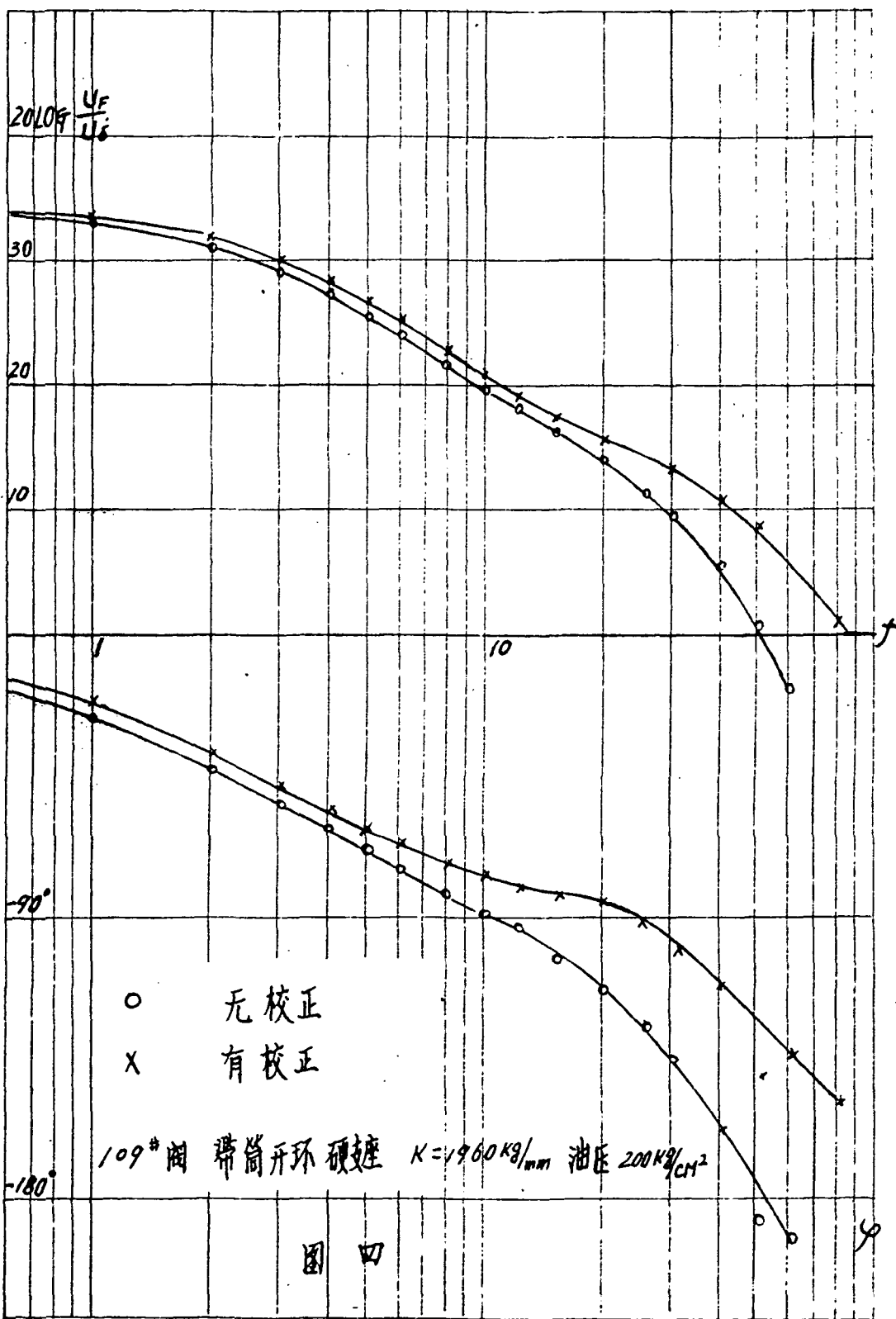
低通网络的结构很简单，只要在速度传感器的输出端对地并一个适当的电容即可，这是因为速度传感器本身具有电感的原因。测试线路如下：



五 随动加载特性

所谓随动加载特性，就是当 $K_d \neq 0$ 时， F/x 随频率 f 的变化特性。如图八、图九所示，前面已经讲过，它实际上是系统对电指令和运动指令的复合反应而已，因此当 K_d 引起的力大大超过附加力时，它的曲线呈水平形式，当 K_d 引起的力和附加力相去不远，或小于附加力，曲线

就 往上翘起，而且它始终落在空载阻尼特性曲线的左侧，这也就很自然了。理论和实践证明随动加载特性曲线的平直段的长度与 K_δ 的大小成正变关系， K_δ 越大，频带越宽，反之就越小，当 $K_\delta = 0$ 时，曲线无平直段，也就是空载特性曲线了，在一定的加载梯度 K_δ 的情况下，要增加平直段的长度，就得采取上面已经讲过的几种办法，图八表示了引入速度讯号后平直段加长的情况。



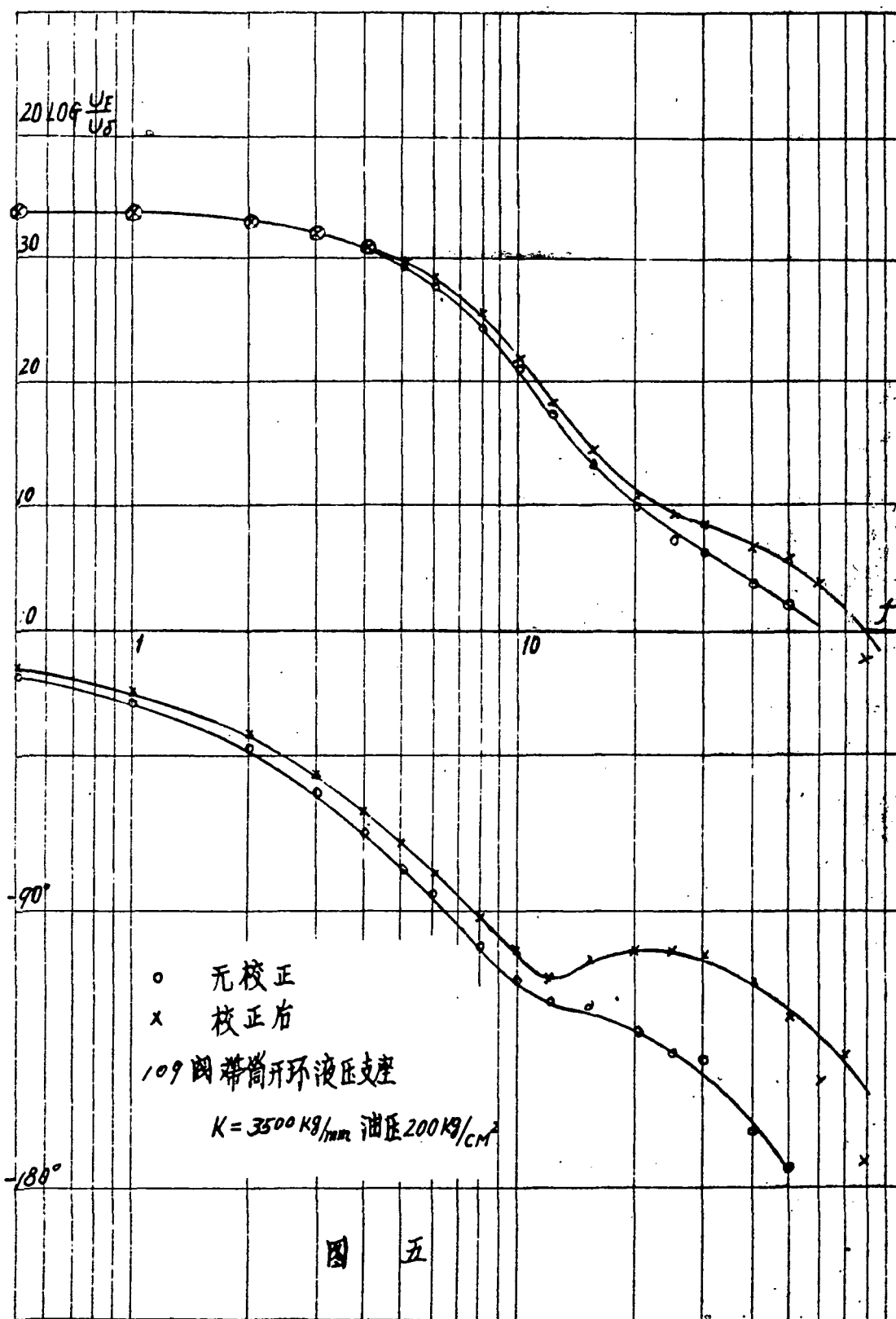


图 五

20log $\frac{F}{Z}$

60

50

40

30

20

10

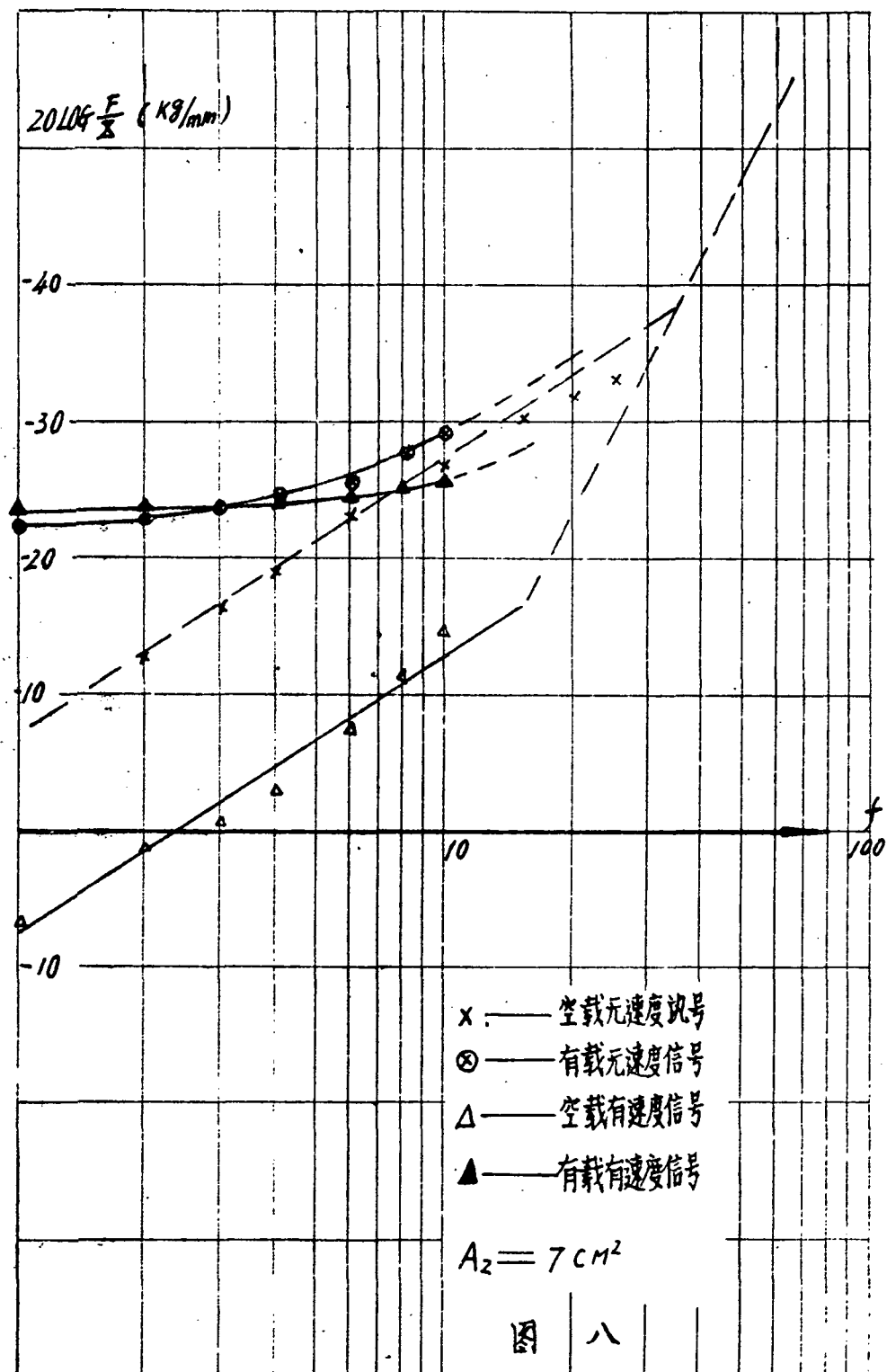
— $T_3 = 0.001257$

- - $T_2 = 0.00455$

10

f
100

图 七



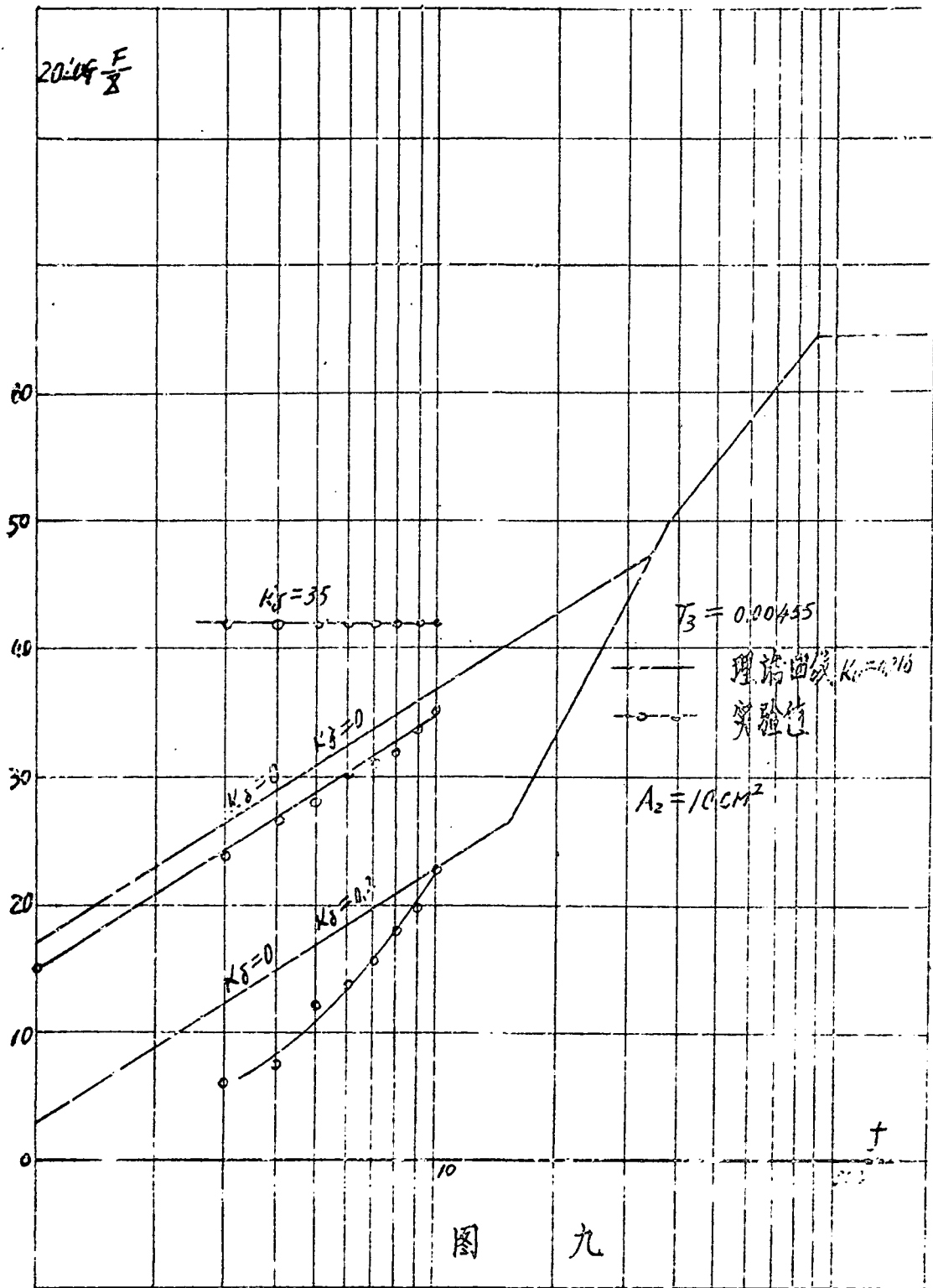


图 九